

РАЗВИТИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ПУЧКА ЧАСТИЦ В ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ

*В. Л. Дорохов^{a, б, 1}, О. И. Мешков^{a, в},
А. И. Стирин^г, А. С. Смыгачева^{а, з}*

^a Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Центр коллективного пользования «СКИФ», Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Кольцово, Россия

^в Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^г Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Работа посвящена развитию метода измерения размеров пучка в циклических ускорителях заряженных частиц с помощью интерферометра на основе схемы Юнга с двухщелевой диафрагмой. Проведена экспериментальная проверка оригинального спектрального метода сканирования интерференционной картины. Приводятся результаты измерений спектра низкочастотных колебаний пучка накопителя Курчатовского источника синхротронного излучения (КИСИ), полученные средствами станции оптического наблюдения (СОН) накопителя.

The work is devoted to the development of a method for measuring beam sizes in cyclic accelerators of charged particles using an interferometer based on the Young scheme with a double-slit diaphragm. Also we have experimentally verified the original spectral method of scanning the interference pattern. The results of measurements of the spectrum of low-frequency oscillations of the storage beam of the Kurchatov synchrotron radiation source (KSRS) obtained by means of the optical observation station (OOS) of the storage ring are presented.

PACS: 29.27.Fh; 29.20.db; 41.75.Ht

ВВЕДЕНИЕ

Современные источники синхротронного излучения (СИ) четвертого поколения [1], обладающие сверхнизким (менее 1 нм) эмиттансом, требуют высокой стабильности пучка электронов для реализации преимуществ высокой яркости и когерентности СИ. В то же время на все компоненты установки неизбежно воздействуют природные, промышленные и бытовые источники вибраций, при этом каждый источник вибраций характеризуется уникальным диапазоном частот и амплитуд. Это способствует возникновению нестабильности положения и/или угла относительно плоскости орбиты

¹E-mail: V.L.Dorokhov@inp.nsk.su

пучка электронов и СИ, средняя величина которой не должна превышать 10% от среднеквадратичного размера пучка и/или угловой расходимости излучения [2, 3].

Кроме негативного влияния на характеристики СИ, нестабильность положения пучка частиц может приводить к завышению его поперечных размеров, определяемых средствами оптической диагностики установки. Такие погрешности недопустимы в прецизионных измерениях эмиттанса пучка — одной из основных характеристик современных накопителей.

Поперечные размеры распределения плотности пучка частиц современных источников синхротронного излучения составляют менее 10 мкм, для наблюдения таких величин давно непригоден метод прямого построения изображения в оптической части спектра СИ. Наиболее простым и доступным способом определения размеров поперечного распределения заряда в пучке, особенно в период ввода в строй нового источника СИ, является двухщелевая интерферометрия [4, 5]. Пространственное разрешение этого метода диагностики, продемонстрированное на ряде установок, составляет около 1 мкм. Такой профилометр функционирует в настоящее время на станции СОН [6, 7] Курчатовского источника синхротронного излучения [8], где типичное измеряемое значение вертикального размера пучка в точке излучения, используемой для вывода света, составляет ≈ 60 мкм.

В Сибирском кольцевом источнике фотонов (СКИФ), строительство которого сейчас ведется в наукограде Кольцово Новосибирской области, характерный размер вертикального распределения частиц пучка в точке излучения, используемой для оптической диагностики, согласно расчетам будет меняться от 8,6 до 28,9 мкм в зависимости от режима работы установки. Для получения расчетных значений вертикального эмиттанса и размера пучка, кроме точных методов настройки оптики, потребуется и диагностика, обеспечивающая возможность измерения требуемых значений. Поэтому было предложено провести ряд измерений на источнике СИ КИСИ «Курчатовского института» для верификации идей, предполагаемых к реализации на СКИФ.

ДВУХЩЕЛЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Интерферометрия как оптический метод измерения малых угловых размеров уже давно стала общепринятым инструментом диагностики в физике ускорителей. На установке КЕК Photon Factory (Япония) этот способ был впервые реализован для наблюдения поперечного распределения заряда электронного пучка размером порядка 10 мкм [4, 5]. Как правило, для диагностики пучков используются интерферометры с делением волнового фронта, работающие с видимым поляризованным квазимонохроматическим СИ из поворотного магнита установки. Классическая схема двухщелевого интерферометра Юнга показана на рис. 1.

Распределение интенсивности интерферограммы, получаемой с помощью диафрагмы с двумя вытянутыми щелевыми отверстиями при отсутствии дисбаланса интенсивностей света, проходящего через щели, определяется выражением

$$I(y) = 2I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left[1 + |\gamma_{\text{кор}}| \cos \left(k \frac{D}{R} y + \varphi_0(x) \right) \right], \quad \alpha = k \frac{a}{2R} y, \quad (1)$$

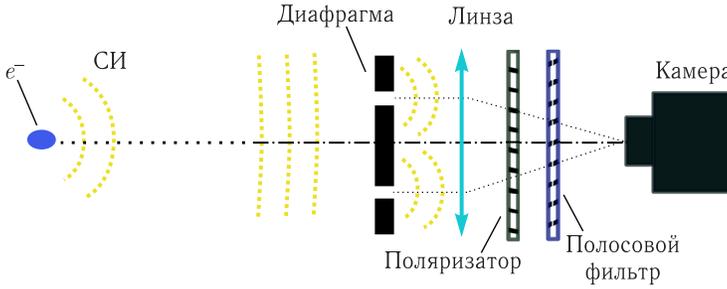


Рис. 1. Двухлучевой интерферометр по схеме Юнга

где I_0 — суммарная интенсивность излучения, прошедшего щели интерферометра; $k = (2\pi)/\lambda$ — волновое число; $|\gamma_{\text{ког}}|$ — степень пространственной когерентности; $\varphi_0(x)$ — пространственная фаза интерферограммы; L — расстояние от источника излучения до диафрагмы со щелями; a — ширина щели; D — расстояние между щелями; R — расстояние до плоскости интерферограммы. Зависимость модуля степени пространственной когерентности от характерного размера σ , источника с гауссовым распределением интенсивности, является функцией Гаусса [4]. Это следствие теоремы Ван Циттера–Цернике, согласно которой комплексная степень пространственной когерентности ($\gamma_{\text{ког}}$) задается преобразованием фурье-функции распределения интенсивности источника излучения $f(x)$ как функция положения x следующим образом:

$$\gamma_{\text{ког}} = \int f(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx, \quad \nu = \frac{D}{\lambda L}, \quad (2)$$

где ν — пространственная частота; D — расстояние между щелями; L — расстояние от источника до диафрагмы. Среднеквадратичный размер распределения интенсивности пучка σ через $|\gamma_{\text{ког}}|$ выражается как

$$\sigma = \frac{1}{\pi\nu} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1}{|\gamma_{\text{ког}}|} \right)}. \quad (3)$$

Из (3) следует зависимость точности вычисляемого размера пучка от значения степени пространственной когерентности и погрешности ее определения:

$$\Delta\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \frac{1}{\gamma_{\text{ког}} \sqrt{8 \ln \gamma_{\text{ког}}^{-1}}} \Delta\gamma_{\text{ког}}, \quad (4)$$

здесь $\Delta\gamma_{\text{ког}}$ — погрешность определения степени пространственной когерентности по картине интерференции. Минимум этой зависимости достигается при

$$|\gamma_{\text{ког}}| = \exp(-0,5) \approx 0,61. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены кривые, демонстрирующие поведение зависимостей (3), (4).

Для интерференционной картины, описываемой выражением (1), модуль степени пространственной когерентности равен видимости, определяемой как

$$V = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (6)$$

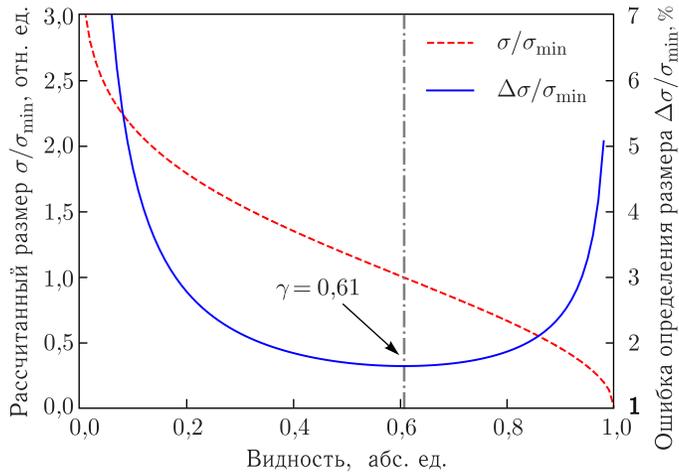


Рис. 2. Зависимости размера пучка и его ошибки от видности. Ошибка определения видности интерференционной картины ($\Delta\gamma_{\text{ког}}$) принята равной 1%. Обе зависимости нормированы на размер пучка при $\gamma = 0,61$ (σ_{min})

где I_{max} и I_{min} — значения сигнала в максимуме и минимуме картины интерференции соответственно. Проводя анализ изображения интерференционной картины, регистрируемой цифровой камерой, легко рассчитать размер источника излучения.

Во время наблюдения размера пучка в штатном режиме работы ускорителя используется фиксированное расстояние между щелями D_{opt} , дающее близкую минимуму функции ошибки видность картины интерференции (см. рис. 2). С точки зрения практической реализации метода желательно расположение щелей на уровне, близком к максимуму углового распределения СИ, что обеспечивает максимальную интенсивность света на матрице регистрирующего прибора. Для примера на рис. 3 приведено

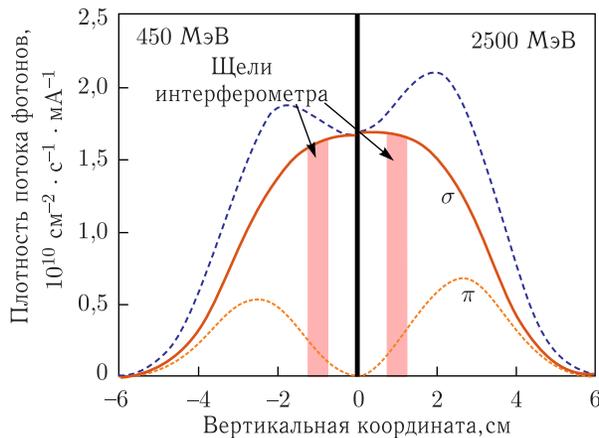


Рис. 3. Вертикальное распределение потока фотонов СИ на щелевой диафрагме интерферометра для энергий инъекции и эксперимента (σ -компонента, π -компонента и суммарная плотность потока)

вертикальное угловое распределение излучения по диафрагме интерферометра СОН КИСИ. Увеличение расстояния между щелями приводит к уменьшению светового потока и, соответственно, к необходимости повышения времени экспозиции регистрирующей камеры. Уменьшение расстояния D сопровождается ухудшением точности измерения размеров пучка при фиксированной длине волны λ (выражения (4), (2), см. рис. 2). Таким образом, важно сохранять возможность поддержания значения видности, не увеличивая расстояние между щелями. Предлагается варьировать значение пространственной частоты ν , изменяя рабочую длину волны излучения λ , задаваемую полосовым фильтром (см. рис. 1) и оставляя постоянным расстояние D_{opt} во время регулярных калибровок диагностики и экспериментов по ускорительной физике, когда эмиттанс пучка будет меняться. Кроме того, это позволит упростить конструкцию узла деления света для одновременного наблюдения вертикального и горизонтального размеров пучка частиц двумя независимыми интерферометрами с щелевой диафрагмой.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

3D-модель станции оптического наблюдения приведена на рис. 4. Элементы оптической диагностики пучка расположены на оптическом столе, который установлен на стальной раме, прикрепленной к полу экспериментального зала и стене биозащиты.



Рис. 4. 3D-модель диагностической станции. Виден вакуумный канал вывода СИ из поворотного магнита

СОН получает свет из поворотного магнита суперпериода накопителя КИСИ (рис. 5). В точке орбиты, из которой синхротронное излучение выводится на СОН, расчетные оптические функции составляют: $\beta_x = 1,936$ м, $\eta_x = 0,377$ м, $\beta_y = 6,529$ м.

Вертикальный размер пучка в накопителе КИСИ близок к дифракционному пределу в оптическом диапазоне длин волн. По этой причине на СОН для его корректного измерения используется двухщелевой интерферометр [7]. Наряду с интерферометрическими измерениями применяется также традиционный проекционный метод

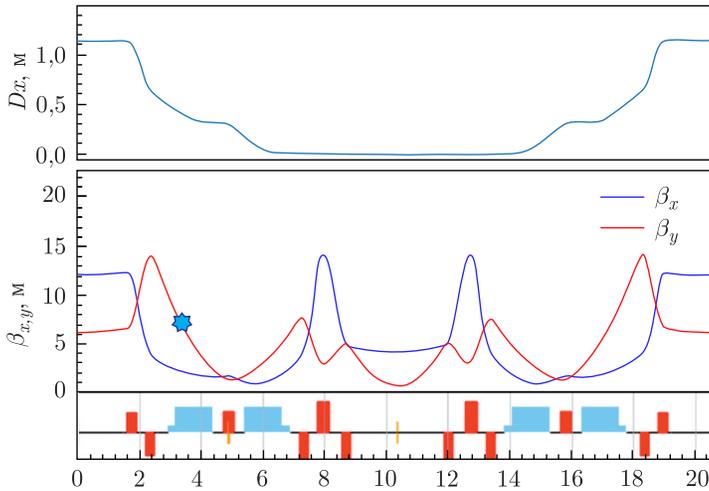


Рис. 5. Оптические функции основного накопителя Курчатовского источника синхротронного излучения на длине суперпериода. Звездочкой обозначено место вывода света для СОН

регистрации изображения пучка с помощью цифровой камеры. Кроме того, СОН включает в свой состав еще четыре детектора, что вынуждает использовать большое количество оптических элементов для деления света между ними. Для простоты на рис. 6 представлена схема деления света только между интерферометром и камерой, регистрирующей оптическое изображение пучка частиц. Интерферометр использует небольшую часть СИ, падающего на первое зеркало оптической диагностики,

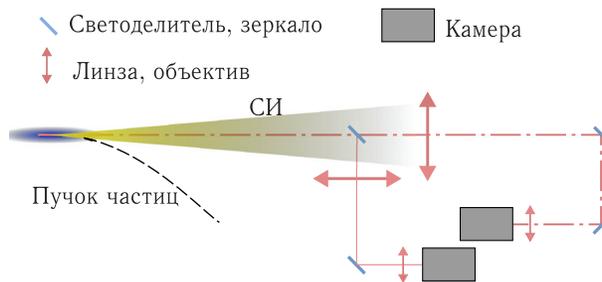


Рис. 6. Схема деления света между интерферометром и камерой, регистрирующей оптическое изображение пучка частиц в стандартной конфигурации СОН

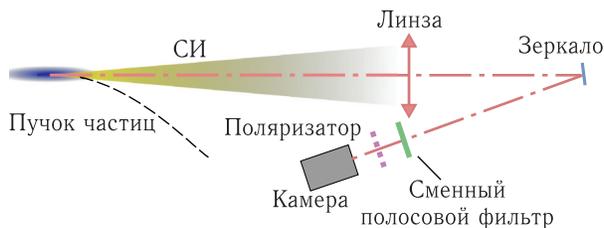


Рис. 7. Схема конфигурации регистрирующей оптики, используемой в измерениях

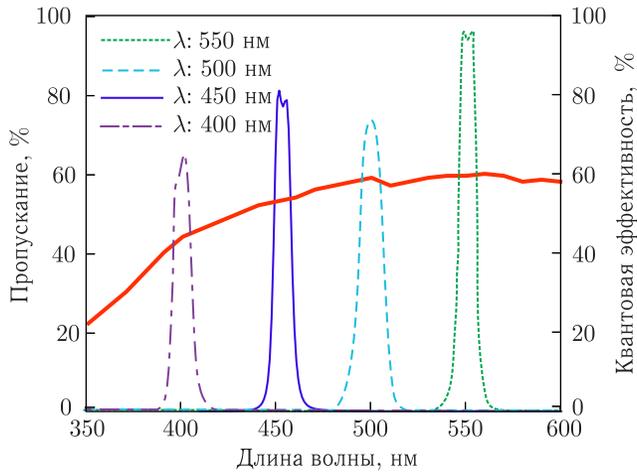


Рис. 8. Спектральные характеристики пропускания фильтров и зависимость квантовой эффективности матрицы камеры Daheng MER-131-75GM (толстая сплошная кривая)

что существенно ограничивает минимальное время экспозиции его цифровой камеры. В наших измерениях для увеличения количества света, попадающего на матрицу камеры, все прочие детекторы СОН были исключены из оптической схемы (рис. 7), а регистрация изображений производилась цифровой камерой Daheng MER-131-75GM. В отличие от Prosilica GC1290, используемой штатно на СОН, она позволяет уверенно считывать кадры с частотой до 2,3 кГц с помощью специально разработанного программного обеспечения. Представленная схема легко трансформировалась в интерферометр установкой диафрагмы со щелями перед линзой. В методе спектрального сканирования интерференционной картины использовались четыре полосовых фильтра шириной на половине высоты $\Delta\lambda = 10$ нм. Полосовые фильтры интерферометра менялись в диапазоне 400–550 нм, спектральные характеристики пропускания фильтров и зависимость квантовой эффективности матрицы камеры Daheng MER-131-75GM приведены на рис. 8.

ВИБРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО СТОЛА И ВИДИМОГО ЦЕНТРА МАСС ПУЧКА ЧАСТИЦ В НАКОПИТЕЛЕ

Предварительно требовалось выяснить вибрационные характеристики оптического стола, на котором установлена аппаратура для оптической диагностики. Дело в том, что световой поток, поступающий на интерферометр, ограничен не только полосовым фильтром и размерами щелей, но и апертурой первого зеркала, установленного перед главным оптическим объективом станции. В связи с этим время экспозиции цифровой камеры, регистрирующей интерференционную картину, приходится увеличивать до нескольких десятков миллисекунд и более в зависимости от тока пучка в накопителе, поэтому поперечные колебания пучка с частотой в десятки герц могут приводить к ухудшению видности интерференционной картины, т. е. завышению реального вертикального размера пучка. Это может стать проблемой измерений для СКИФ, поскольку сравнение расчетного и экспериментального эмиттансов пучка про-

водят при минимальном числе частиц в сгустке для пренебрежения коллективными эффектами. Связанное с этим пропорциональное уменьшение числа фотонов, излучаемых пучком, заставляет увеличивать время экспозиции камеры, т. е., избавляясь от одной проблемы, есть вероятность столкнуться с другой, что подчеркивает актуальность наших экспериментов. Вообще говоря, спектр колебаний оптического стола паспортизируется производителем, но нуждается в дополнительном исследовании при конкретном способе монтажа.

Разумеется, низкочастотные поперечные колебания пучка на орбите, связанные, например, с шумами корректоров, также могут стать причиной систематических ошибок при измерениях его размеров. Такого рода эффекты эпизодически наблюдались

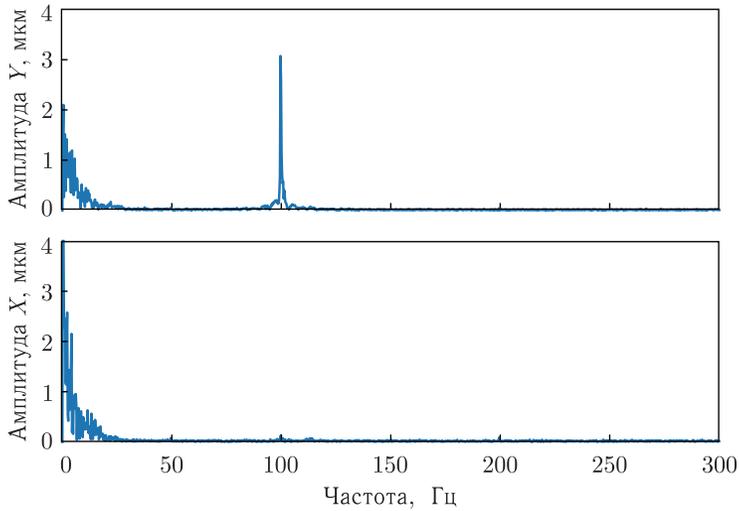


Рис. 9. Спектр вертикальных колебаний оптического стола СОН

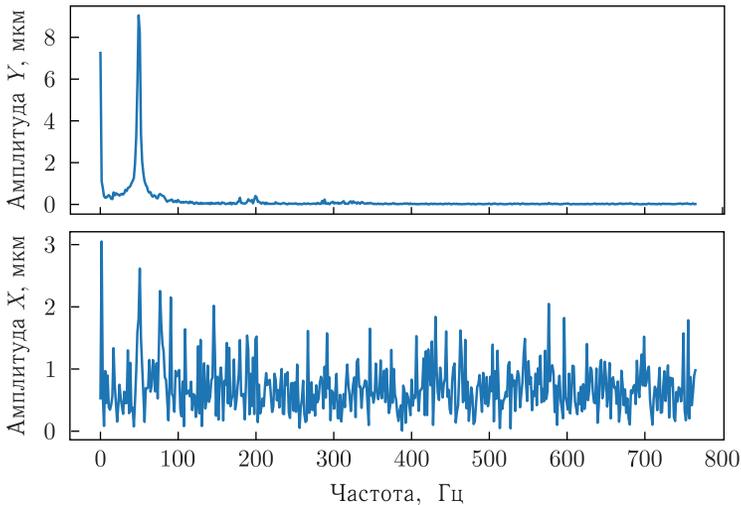


Рис. 10. Спектр колебаний центра тяжести пучка, зарегистрированный на СОН

операторами КИСИ, и целью проведенных экспериментов являлось также выяснение спектра этих колебаний.

Измерение вибрационных характеристик стола проводилось с помощью регистрации изображения реперного источника цифровой камерой. В качестве тестового объекта для регистрации использовалось пятно лазерного пучка, проецируемое на стену биозащиты комплекса возле оптического стола станции. Время экспозиции камеры составляло 10 мкс. Фурье-анализ вертикальных колебаний центра тяжести изображения (рис. 9) выявил максимум с амплитудой около 3 мкм на частоте 100 Гц. В спектре горизонтальных колебаний стола заметных особенностей обнаружено не было.

Исследования вертикального и радиального дрожания центра масс пучка частиц проводились с помощью той же методики и программного обеспечения, что и измерения спектра колебаний оптического стола. Зарегистрированный спектр колебаний центра тяжести пучка содержит отчетливый максимум с амплитудой 9 мкм на частоте 50 Гц и слабый пик с пренебрежимо малой амплитудой на частоте 100 Гц (рис. 10).

Вместе с тем проведенные эксперименты выявили существование иррегулярных смещений пучка с частотами менее 1 Гц и амплитудами масштаба σ_y , природа которых пока не ясна. В спектре радиальных колебаний пучка никаких особенностей выше уровня шумов зарегистрировано не было. Поиск причины колебаний пучка с частотой 50 Гц требует отдельных исследований.

ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗМЕРА ПУЧКА

В этих измерениях пространственная частота ν изменялась как перестройкой длины волны регистрируемого квазимонохроматического света λ , задаваемой полосовым фильтром, так и расстояния D между щелями в диафрагме интерферометра. Для каждого из фильтров регистрировались интерферограммы при изменении расстояния между щелями интерферометра в пределах 10–25 мм. Полученные результаты представлены на рис. 11–15. Сравнить интерферограммы при переходе от длины волны света в 400 нм к длине волны 550 нм можно с помощью рис. 11, сплошные кривые соответствуют результату аппроксимации экспериментальных точек теоретической за-

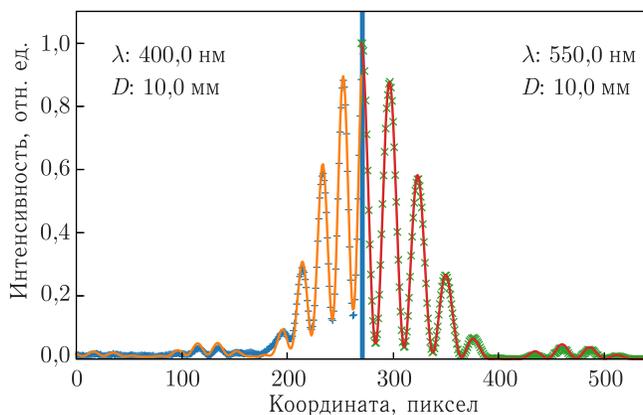


Рис. 11. Сравнение регистрируемых профилей интерферограмм для диафрагмы с расстоянием между щелями $D = 10$ мм

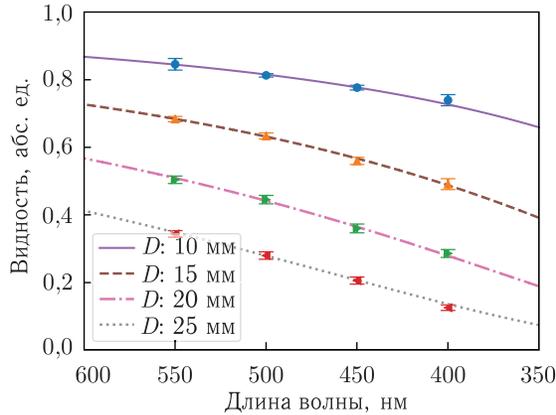


Рис. 12. Зависимости видности от длины волны для разных расстояний между щелями диафрагмы

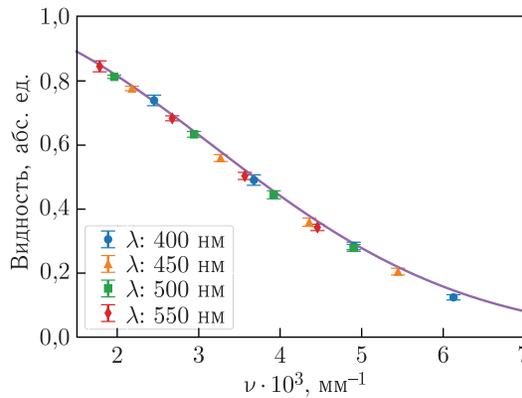


Рис. 13. Зависимости видности от пространственной частоты ν

висимостью (1). Как и следовало ожидать, повышение длины волны приводит к увеличению видности (улучшению контрастности) интерференционной картины и увеличению расстояния между интерференционными максимумами. Рис. 12 демонстрирует изменение видности при сканировании пространственной частоты изменением длины волны при различных расстояниях между щелями. Полученные экспериментальные значения хорошо ложатся на теоретическую кривую. На рис. 13 представлено расчетное и измеренное изменение видности в зависимости от пространственной частоты ν интерференционной картины, соответствующие представленным на рис. 12 всем использованным сочетаниям D и λ . Наконец, на рис. 14 объединены значения вертикального размера пучка, вычисленные из всех полученных интерферограмм. Точность измерений определялась шумами в зарегистрированной интерференционной картине. Как можно заметить, вертикальные размеры пучка, определенные при разных сочетаниях длин волн и расстояний между щелями D и λ , находятся в хорошем согласии друг с другом. Общее время, потраченное на измерения, составило около 3 ч, что, однако же, много меньше времени жизни пучка в ускорителе, равного 26 ч, поэтому можно пренебречь зависимостью вертикального размера пучка от тока. Погрешность

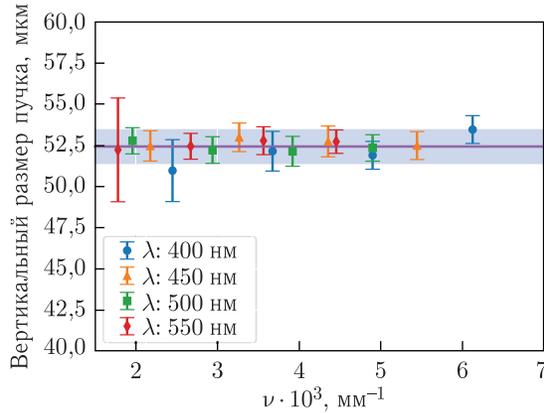


Рис. 14. Зависимость измеряемого размера пучка от пространственной частоты ν

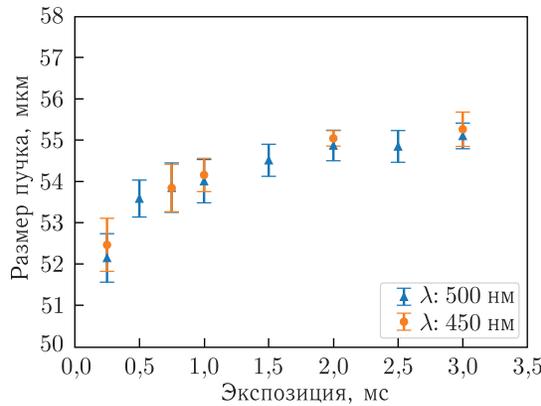


Рис. 15. Зависимость измеряемого размера пучка от времени экспозиции регистрирующей камеры

определения размера крайней левой точки на графике рис. 14 обусловлена поведением функции ошибки, описываемой выражением (4) и представленной на рис. 2. На рис. 15 приводится измеряемый размер пучка в зависимости от времени экспозиции. Влияние вибраций снижается с уменьшением времени экспозиции ниже 2 мс, однако уменьшение количества света приводит к ухудшению отношения сигнал/шум и точности определения размера. В целом измеренный в этих экспериментах вертикальный размер пучка находится в хорошем согласии с величиной, определенной двумя годами ранее, что говорит о стабильности режима работы накопителя КИСИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Измерен спектр низкочастотных поперечных колебаний пучка в Курчатовском источнике синхротронного излучения. Показано, что колебания с частотами более 10 Гц увеличивают поперечный размер пучка на 10–15%. Степень влияния на видимый размер пучка более низкочастотных колебаний требует дополнительного изучения.

2. Экспериментально апробирован спектральный метод сканирования видности интерференционной картины для измерения поперечных размеров пучка.

3. Вообще говоря, на измеряемый размер пучка могут влиять как дипольные колебания его центра тяжести, вызываемые пульсациями тока поперечных корректоров и поворотных магнитов, так и квадрупольные колебания, связанные с пульсациями тока в квадрупольных линзах. Можно пытаться обнаружить квадрупольные колебания размеров пучка, анализируя изменения видности интерференционной картины, но на данном этапе мы ограничились изучением спектра дипольных колебаний, реагируя на запросы команды КИСИ.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-22-00177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shin S.* New Era of Synchrotron Radiation: Fourth-Generation Storage Ring // *AAPPS Bull.* 2021. V. 31, No. 1. P. 21; <http://dx.doi.org/10.1007/s43673-021-00021-4>.
2. *Simos N.* Synchrotron Facilities: Vibration and Stability Challenge // *Synchrotron Radiation News.* 2019. V. 32, No. 5. P. 2–3; <https://doi.org/10.1080/08940886.2019.1654825>.
3. *Hettel R. O.* Beam Stability at Light Sources // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73. P. 1396–1401; <http://dx.doi.org/10.1063/1.1435812>.
4. *Mitsuhashi T.* Beam Profile and Size Measurement by SR Interferometer // *Beam Measurement: Proc. of the Joint US–CERN–Japan–Russia School on Part. Accel., Montreux, CERN, Switzerland, May 11–20, 1998.* World Sci., 1999. P. 399–427; <https://books.google.ru/books?id=BMWpKZOjzmMC>.
5. *Naito T., Mitsuhashi T.* Very Small Beam-Size Measurement by a Reflective Synchrotron Radiation Interferometer // *Phys. Rev. ST Accel. Beams.* 2006. V. 9. P. 122802; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.9.122802>.
6. *Meshkov O., Dorokhov V., Stirin A., Korchuganov V., Khilchenko A. et al.* A New Station for Optical Observation of Electron Beam Parameters at Electron Storage Ring SIBERIA-2 // *J. Instrum.* 2016. V. 11, No. 12. P. P12015–P12015; <https://doi.org/10.1088%2F1748-0221%2F11%2F12%2Fp12015>.
7. *Дорохов В.Л.* Развитие методов оптической диагностики в циклических ускорителях заряженных частиц. Дис. . . канд. техн. наук. Новосибирск, 2021.
8. *Blokhov M., Leonov V., Fomin E. et al.* Kurchatov Synchrotron Radiation Source Facilities Modernization // *Proc. of the 22nd Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC), Protvino, Russia, Sept. 27 – Oct. 1, 2010.*

Получено 12 января 2023 г.